

УДК 621.436-55

НЕЙРОСЕТЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АДАПТИВНОЙ КРИТИКИ

С.А. Сериков, доцент, к.т.н., ХНАДУ

Аннотация. Приведена формальная постановка оптимизационной задачи управления силовой установкой гибридного автомобиля. Рассмотрено её решение методом нейросетевого управления на основе адаптивной критики.

Ключевые слова: гибридный автомобиль, гибридная силовая установка, оптимальное управление, нейросетевое управление, адаптивный критик.

НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ КЕРУВАННЯ ГІБРИДНОЮ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ НА ОСНОВІ МЕТОДУ АДАПТИВНОЇ КРИТИКИ

С.А. Серіков, доцент, к.т.н., ХНАДУ

Анотація. Приведено формальну постановку оптимізаційної задачі керування силовою установкою гібридного автомобіля. Розглянуто її розв'язання методом нейромережевого керування на основі адаптивної критики.

Ключові слова: гібридний автомобіль, гібридна силова установка, оптимальне керування, нейромережеве керування, адаптивний критик.

NEURAL NETWORKS CONTROL OF THE HYBRID POWER UNIT BASED ON THE METHOD OF ADAPTIVE CRITICS

S. Serikov, Associate Professor, Candidate of Technical Science, KhNAHU

Abstract. The formal statement of the optimization problem of hybrid vehicle power unit control is given. Its solving by neural networks method application on the basis of adaptive critic is considered.

Key words: hybrid vehicle, hybrid power unit, optimum control, neural networks control, adaptive critic.

Введение

Экономичность и экологическая безопасность гибридного автомобиля в значительной степени определяется качеством управления его силовой установкой и степенью соответствия выбранной стратегии управления текущему тягово-скоростному режиму. Данное обстоятельство диктует необходимость придания системе автоматического управления гибридной силовой установкой (САУ ГСУ) адаптивных свойств, т.е. способности выбора стратегии управления агрегатами ГСУ, которая минимизирует выбранный функционал на текущем ездовом цикле при заданных ограничениях.

Анализ публикаций

В настоящее время существует достаточно большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных оптимизации управления силовой установкой гибридных автомобилей [1–3]. Вместе с тем ряд особенностей процесса управления ГСУ и связанных с ними возможностей остаются неисследованными. Так, при исследовании процессов адаптации стратегии управления агрегатами ГСУ к изменяющимся условиям их функционирования практически не рассматривались богатые возможности методов нейроуправления на основе адаптивных критиков [4–6].

Цель и постановка задачи

Целью данной работы является исследование особенностей задачи синтеза адаптивного управления силовой установкой гибридного автомобиля. При этом предложен эффективный способ уменьшения размерности оптимизационной задачи путём введения новой переменной – коэффициента использования электропривода. Рассмотрена возможность реализации адаптивного управления ГСУ на основе использования метода нейросетевых адаптивных критиков.

Гибридный автомобиль как объект управления по скорости

Пусть автомобиль с ГСУ как управляемая система может быть идеализирован настолько, что в каждый фиксированный момент времени наблюдения $t = t'$ на интервале $T = \{t | t_s \leq t \leq t_f\}$, $t' \in T$ его свойства могут быть описаны двумя действительными числами: $\omega(t')$ – текущая угловая скорость вращения ведущих колёс; $\theta_{TAB}(t')$ – состояние накопителя энергии (степень заряженности тяговой аккумуляторной батареи). Будем рассматривать данные величины как компоненты вектора состояния системы $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) = [\omega(t), \theta_{TAB}(t)]^T$ в момент времени t' . Множество всех возможных состояний в различные моменты времени $t \in T$ образует двумерное пространство состояний \mathbf{X}

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X} \subset \mathbb{R}_+^2, \forall t \in T, \mathbf{X} = \left[\begin{array}{l} 0 \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ 0 \leq \theta_{TAB} \leq 1 \end{array} \right],$$

где ω_{\max} – максимальная угловая скорость вращения ведущих колёс. На множестве \mathbf{X} можно выделить подмножество эксплуатационных состояний

$$\mathbf{X}_{ex} = \left[\begin{array}{l} 0 \leq \omega \leq \omega_{ex.\max} \\ \theta_{ex.\min} \leq \theta_{TAB} \leq \theta_{ex.\max} \end{array} \right] \subset \mathbf{X}.$$

Выход состояния системы за пределы \mathbf{X}_{ex} не желателен, хотя и не ведёт к аварийной ситуации.

Будем рассматривать автомобиль с ГСУ как многомерный нелинейный стационарный объект вида

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \xi) \\ \mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{cases},$$

где $\mathbf{u} = [\beta_D, \beta_M, \beta_T, \gamma]^T$ – вектор управления; β_D – сигнал управления мощностью ДВС. $\beta_D = -1$ соответствует отключенному состоянию ДВС; β_M – сигнал управления вспомогательной силовой установкой (электромагнитным моментом вентильного электродвигателя); β_T – сигнал управления системой гидравлического торможения; γ – передаточное отношение трансмиссии автомобиля. При использовании пятиступенчатой коробки передач γ может принимать одно из пяти фиксированных значений. Полагаем, что управляющие воздействия должны быть ограничены, т.е. $\mathbf{u} \in \mathbf{U} \subset \mathbb{R}^4 \forall t \in T$,

$$\mathbf{U} = \left[\begin{array}{l} \beta_D = -1, \quad 0 \leq \beta_D \leq 1 \\ -1 \leq \beta_M \leq 1 \\ 0 \leq \beta_T \leq 1 \\ \gamma \in \{\gamma_i\}, i = \overline{1,5} \end{array} \right].$$

Вектор управления может быть задан как программное управление

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(t) = [\beta_D(t), \beta_M(t), \beta_T(t), \gamma(t)]^T,$$

либо в виде координатного управления

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}) = [\beta_D(\mathbf{x}), \beta_M(\mathbf{x}), \beta_T(\mathbf{x}), \gamma(\mathbf{x})]^T;$$

$\xi = \xi(t) = [\alpha(t), \vartheta_0(t)]$ – вектор возмущающих воздействий, $\xi \subset \mathbb{R}^2 \forall t \in T$; α – уклон дороги; ϑ_0 – скорости встречного ветра; $\mathbf{y} = \mathbf{y}(t) = [V(t), G_T(t), E_T(t)]^T$ – вектор выхода, $\mathbf{y} \subset \mathbb{R}^3, \forall t \in T$; V – скорость автомобиля; G_T – часовой расход топлива ДВС; $E_T = f_T(C_{NOx}, C_{CO}, C_{HC})$ – степень токсичности отработавших газов ДВС; C_{NOx} , C_{CO} , C_{HC} – часовая эмиссия оксидов азота, оксида углерода и углеводородов соответственно; $f(\bullet)$ и $h(\bullet)$ – известные непрерывные или кусочно-непрерывные вектор-функции векторных аргументов, определенные на соответствующих множествах.

Кроме условий принадлежности состояния автомобиля с ГСУ и управляющих воздействий к множествам возможных состояний $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, $\forall t \in T$ и допустимых управлений $\mathbf{u} \in \mathbf{U}$, $\forall t \in T$, на рассматриваемую динамическую систему наложены ограничения в виде неголономной связи $f_c(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0$, обусловленные динамическими свойствами собственно автомобиля, ГСУ и аппаратуры управления. Данные ограничения определяются кинематической схемой ГСУ и трансмиссии автомобиля

$$J_K \cdot \frac{d\omega}{dt} - M_{VR} + M_{SP} + M_{FR} = 0,$$

где $J_K = J_K(\gamma)$ – суммарный момент инерции; $M_{VR} = M_{VR}(\omega, \mathbf{u})$ – момент сил вращения, развиваемый ГСУ; $M_{SP} = M_{SP}(\omega, \alpha)$ – момент сил сопротивления движению автомобиля; M_{FR} – момент сопротивления, обусловленный силами трения в элементах трансмиссии. В последнем выражении момент инерции и все моменты сил приведены к оси вращения ведущих колёс.

Основной функцией САУ ГСУ является выполнение задачи слежения, т.е. поддержание с минимальной ошибкой заданной скорости автомобиля $V_{zd}(t)$ при наличии возмущений $\xi(t)$, $t \in T$. Кроме этого, процесс управления должен удовлетворять ряду дополнительных условий: минимизации расхода топлива, уровня токсичности отработавших газов, отклонения степени заряженности ТАБ от оптимальной.

Постановка оптимизационной задачи в дискретном виде

Модель гибридного автомобиля как объекта управления по скорости может быть представлена в дискретном виде. Для этого выберем шаг дискретизации процесса управления по времени ΔT . Будем рассматривать векторные функции $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{y}(t)$ и $\xi(t)$ только в дискретные моменты времени $t_k = t_s + k\Delta T$, $k = \overline{0, N}$, $N = (t_f - t_s)\Delta T^{-1}$: $\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(t_k)$; $\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(t_k)$; $\mathbf{y}(k) = \mathbf{y}(t_k)$ и $\xi(k) = \xi(t_k)$, $t_k \in T$. Если применить замену производной конечной разностью

$\dot{\mathbf{x}} \approx \Delta \mathbf{x} = (\mathbf{x}(k+1) - \mathbf{x}(k))\Delta T^{-1}$, можно записать разностные уравнения автомобиля с ГСУ

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \Delta T \cdot f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \xi(k)) \\ \mathbf{y}(k) = h(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) \end{cases}$$

Уравнение неголономной связи в этом случае приобретет вид

$$J_K(k) \cdot \frac{\omega(k+1) - \omega(k)}{\Delta T} - M_{VR}(k) + M_{SP}(k) + M_{FR}(k) = 0$$

Для того чтобы замена операции дифференцирования взятием конечной разности была правомерна, необходимо, чтобы ΔT было мало по сравнению с наименьшей из постоянных времени процесса управления.

Функционал качества управления ГСУ может быть представлен в виде

$$J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{Pi} \mathfrak{S}_i(k),$$

где $\mathbf{K}_P = [K_{PV}, K_{P0}, K_{PG}, K_{PE}]^T$ – вектор приоритетов, учитывающий степень важности отдельных критериев оптимальности; $\mathfrak{S}(k) = [J_{V_k}, J_{0k}, J_{Gk}, J_{Ek}]^T$ – векторный критерий качества управления на k -м шаге. Отдельные компоненты вектора $\mathfrak{S}(k)$ характеризуют управление, переводящее систему из состояния $\mathbf{x}(k)$ в состояние $\mathbf{x}(k+1)$

$$J_{V_k}(k) = K_{NV} \left((V_{zd}(k+1) - V(k+1))^2 + S_V^2(V(k+1)) \right);$$

$$J_{0k}(k) = K_{N0} \left(\left(\theta_{TAB,0}(k+1) - \theta_{TAB}(k+1) \right)^2 + S_0^2(\theta_{TAB}(k+1)) \right);$$

$$J_{Gk}(k) = K_{NG} G_T^2(k);$$

$$J_{Ek}(k) = K_{NE} \begin{pmatrix} K_{ENox} \cdot C_{NOx}^2(k) + \\ + K_{ECO} \cdot C_{CO}^2(k) + \\ + K_{EHC} \cdot C_{HC}^2(k) \end{pmatrix},$$

где $\mathbf{K}_N = [K_{NV}, K_{N0}, K_{NG}, K_{NE}]^T$ – вектор нормирующих коэффициентов, обеспечивающих приведение компонентов вектора $\mathfrak{Z}(k)$ к безразмерным величинам и нормирование; J_V – функция штрафа за выход из области эксплуатационных режимов \mathbf{X}_{ex}

$$S_V(V(k)) = \begin{cases} 0, & V(k) \leq V_{ex.max}, \\ V(k) - V_{ex.max}, & V(k) > V_{ex.max}; \end{cases}$$

$V_{ex.max} = r_k \omega_{ex.max}$ – максимальная эксплуатационная скорость; r_k – радиус качения ведущих колёс; $\theta_{TAB,0}$ – оптимальная степень заряженности ТАБ; S_θ – функция штрафа за выход текущей степени заряженности ТАБ из области эксплуатационных режимов \mathbf{X}_{ex} :
 $S_\theta(\theta_{TAB}(t)) = 0$, при $\theta_{ex.min} \leq \theta_{TAB}(t) \leq \theta_{ex.max}$;
 $S_\theta(\theta_{TAB}(t)) = |\theta_{ex.min} - \theta_{TAB}(t)|$, при условии $\theta_{ex.min} > \theta_{TAB}(t) > \theta_{ex.max}$; K_{ENox} , K_{ECO} , K_{EHC} – коэффициенты токсичности соответствующих компонентов отработавших газов. Данные коэффициенты должны определяться с учётом влияния компонентов на здоровье человека и окружающую среду, а также их удельного содержания в отработавших газах. При этом должно выполняться соотношение $K_{ENox} + K_{ECO} + K_{EHC} = 1$.

Оптимизационная задача управления ГСУ сводится к выбору оптимальной последовательности управлений $\mathbf{u}^*(k)$, которая на заданном ездовом цикле $V_{zd}(k)$, $k = \overline{0, N}$ доставляет минимум функционалу $J_{SV} = J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N)$ и удовлетворяет ограничениям на переменные состояния, управляющие воздействия и ограничениям неголономной связи

$$J_{SV}^* = J_{SV}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, N) = \min_{\mathbf{x}, \mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N),$$

$$\mathbf{x}^*(k) \in \mathbf{X}, \quad \mathbf{u}^*(k) \in \mathbf{U},$$

$$f_c(\Delta \mathbf{x}^*(k), \mathbf{x}^*(k), \mathbf{u}^*(k)) = 0, \quad \forall k = \overline{0, N}.$$

При этом значение J_{SV}^* будем называть оптимальным значением функционала качества управления, а векторную функцию

$$\mathbf{u}^* = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N),$$

доставляющую функционалу оптимальное значение, – оптимальным управлением.

Регулятор скорости автомобиля

Решение сформулированной оптимизационной задачи наталкивается на ряд трудностей, связанных с идентификацией математической модели гибридного автомобиля как объекта управления, а также с недостатком априорной информации о параметрах ездового цикла.

Одним из способов преодоления указанных трудностей является использование концепции адаптивного управления, когда низкая точность математических моделей и недостаток априорной информации восполняются за счёт более полного использования текущей информации. В этом случае характеристики системы управления целесообразно представить в виде параметрически задаваемых функций, а настройку производить путём итеративной оптимизации параметров.

Вместе с тем нахождение оптимального управления \mathbf{u}^* на заданном ездовом цикле не указывает конструктивного пути для построения системы управления. В связи с этим возникает задача синтеза алгоритма управления (регулятора), обеспечивающего получение управления оптимального или близкого к оптимальному за счёт замыкания системы по переменным состояниям: $\mathbf{u}^* = f_u(\mathbf{x}, V_{zd})$. Кроме данного регулятора, САУ ГСУ должна иметь в своём составе блок адаптации, обеспечивающий асимптотическое приближение $J_{SV} \rightarrow J_{SV}^*$ и $\mathbf{u} \rightarrow \mathbf{u}^*$ при $t \rightarrow \infty$ путём настройки параметров регулятора.

Рассмотрим структурную схему САУ ГСУ, приведенную на рис. 1.

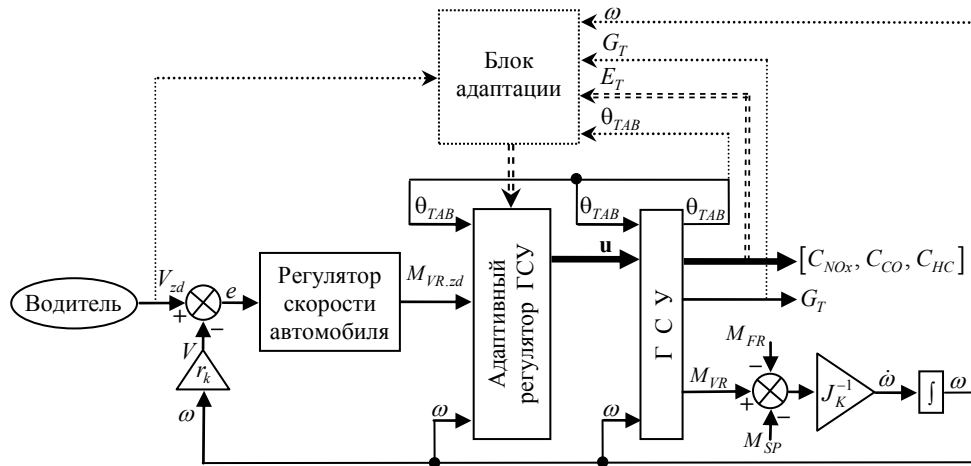


Рис. 1. Система автоматического управления силовой установкой гибридного автомобиля

На данной схеме $M_{VR.zd}$ – момент вращения ГСУ, требуемый для поддержания заданного тягово-скоростного режима. При этом система гидравлического торможения условно отнесена к ГСУ для удобства изложения. Сигнал $M_{VR.zd}$ является выходным для регулятора скорости автомобиля

$$M_{VR.zd} = f_{V.RG}(V, V_{zd})$$

и входным сигналом адаптивного регулятора ГСУ.

Момент сил сопротивления движению автомобиля, приведенный к ведущим колёсам, определяется из выражения [7]

$$M_{SP} = (F_K + F_\alpha + F_L)r_k,$$

где $F_K = k_{pk}m_A g \cdot \cos(\alpha)$ – сила сопротивления качению, являющаяся следствием деформаций, возникающих в зоне контакта шины с дорогой; $F_\alpha = m_A g \cdot \sin(\alpha)$ – сила сопротивления движению на подъём или под уклон; $F_L = 0,5\rho_0 c_w S_A (V + \vartheta_0)^2$ – сила аэродинамического сопротивления; k_{pk} – коэффициент сопротивления перекачиванию, который зависит от особенностей дорожного покрытия и качества шин; m_A – масса автомобиля; g – ускорение свободного падения; ρ_0 – плотность воздуха; c_w – коэффициент аэродинамического сопротивления; S_A – площадь наибольшего поперечного сечения автомобиля.

Если $M_{VR.zd} = M_{VR.zd}(t)$ рассматривать как скалярное управляющее воздействие $M_{VR.zd} \in [M_{VR.min}, M_{VR.max}] \subset \mathbb{R}^1, \forall t \in T$ и предположить, что $\vartheta_0 = 0$, гибридный автомобиль как динамическая система может быть представлен моделью вида

$$a\dot{V} + bV^2 + c = M_{VR.zd},$$

где $a = J_K r_k^{-1}$; $b = 0,5\rho_0 c_w S_A r_k$; $c = (F_\alpha + F_K)r_k + M_{FR}$.

Применим к управляющему воздействию системы нелинейное преобразование вида

$$\tilde{M}_{VR.zd} = f_{np}(M_{VR.zd}, V) = M_{VR.zd} - bV^2 + \tilde{b}V,$$

где $\tilde{b} = \text{const}$. В результате получим линейное представление нелинейной модели гибридного автомобиля относительно управления $\tilde{M}_{VR.zd}$: $a\dot{V} + \tilde{b}V + c = \tilde{M}_{VR.zd}$.

Для данной модели с использованием стандартных методов теории линейных систем может быть получен регулятор скорости автомобиля $\tilde{M}_{VR.zd} = \tilde{M}_{VR.zd}(V, V_{zd})$, обеспечивающий минимизацию функционала $J_V \rightarrow \min$, и исследована устойчивость системы. Затем управляющее воздействие $M_{VR.zd}$ находится с использованием обратного преобразования

$$M_{VR.zd} = f_{np}^{-1}(\tilde{M}_{VR.zd}, V) = f_{V.RG}(V, V_{zd}).$$

Адаптивное управление агрегатами гибридной силовой установки

Для ГСУ с параллельной схемой построения можно записать

$$M_{VR}(\omega, \mathbf{u}) = \gamma M_{DVS}(\omega\gamma^{-1}, \beta_D) + \gamma_M M_{VD}(\omega\gamma_M^{-1}, \beta_M) - M_{irm}(\beta_T),$$

где M_{DVS} – эффективный крутящий момент ДВС,

$$M_{DVS} \in [M_{DVS.min}(\omega\gamma^{-1}), M_{DVS.max}(\omega\gamma^{-1})];$$

M_{VD} – момент вращения или торможения, развиваемый электроприводом в двигательном или генераторном режиме,

$$M_{VD} \in [M_{VD.min}(\omega\gamma_M^{-1}), M_{VD.max}(\omega\gamma_M^{-1})];$$

M_{irm} – тормозной момент, развиваемый гидравлической системой торможения,

$$M_{irm} \in [0, M_{irm.max}];$$

γ_M – передаточное отношение трансмиссии от тягового электродвигателя к ведущим колёсам. Задачей адаптивного регулятора ГСУ является такое перераспределение нагрузки между отдельными её агрегатами, которое обеспечивает поддержание заданного тягово-скоростного режима $M_{VR} = M_{VR.zd}$ и обращает в минимум выбранный функционал качества $J_{SV} \rightarrow \min$.

С целью уменьшения размерности задачи для описания перераспределения нагрузки между агрегатами ГСУ введём коэффициент использования электропривода

$$\varepsilon = \frac{\gamma_M M_{VD}}{M_{VR}}, \quad M_{VR} \neq 0.$$

В процессе торможения автомобиля, когда $M_{VR} < 0$, коэффициент $\varepsilon \in [0, 1]$ характеризует уровень рекуперации энергии торможения. При $\varepsilon = 0$ торможение осуществляется исключительно за счёт гидравлической тормозной системы. При $\varepsilon = 1$ весь требуемый тормозной момент создаётся тяговым электроприводом в генераторном режиме:

$M_{VR} = \gamma_M \cdot M_{VD}$, $M_{VD.min} \leq M_{VD} < 0$. При $0 < \varepsilon < 1$ тормозное усилие создаётся с использованием обеих тормозных систем.

При разгоне автомобиля либо равномерном движении, когда $M_{VR} > 0$, коэффициент $\varepsilon \in [-\infty, 1]$ характеризует перераспределение потребляемой энергии между ДВС и тяговым электроприводом. При $\varepsilon < 0$ тяговый электропривод работает в генераторном режиме и осуществляет подзарядку тяговой аккумуляторной батареи с использованием энергии, вырабатываемой ДВС. Если $\varepsilon = 0$, для создания тягового усилия используется только ДВС. При $0 < \varepsilon < 1$ тяговое усилие создаётся за счёт совместного использования тягового электропривода и ДВС. При $\varepsilon = 1$ используется только тяговый электропривод.

Рассмотрим дискретный процесс управления ГСУ. При известных моделях агрегатов, входящих в состав ГСУ: $M_{DVS} = M_{DVS}\left(\frac{\omega}{\gamma}, \beta_D\right)$,

$M_{VD} = M_{VD}\left(\frac{\omega}{\gamma_M}, \beta_M\right)$ и $M_{irm} = M_{irm}(\beta_T)$, могут быть получены их обратные модели вида

$$\beta_D = M_{DVS}^{-1}\left(\frac{\omega}{\gamma}, M_{DVS}\right), \quad \beta_M = M_{VD}^{-1}\left(\frac{\omega}{\gamma_M}, M_{VD}\right)$$

и $\beta_T = M_{irm}^{-1}(M_{irm})$. В этом случае на k -м шаге управления при заданном коэффициенте использования электропривода $\varepsilon(k)$ управляющие воздействия ГСУ $\mathbf{u}(k) = [\beta_D(k), \beta_M(k), \beta_T(k), \gamma(k)]^T$, которые обеспечивают требуемое значение $M_{VR.zd}(k)$, находятся с использованием следующих выражений.

При $M_{VR.zd}(k) < 0$ компоненты вектора управления

$$\beta_D(k) = -1;$$

$$\beta_M(k) = M_{VD}^{-1}\left(\omega(k) \cdot \gamma_M^{-1}, M_{VD.zd}(k)\right);$$

$$\beta_T(k) = M_{irm}^{-1}(M_{irm.zd}(k));$$

$$\gamma(k) = \gamma(k-1),$$

где

$$M_{VD.zd}(k) = \max \left\{ \frac{M_{VR.zd}(k)}{\gamma_M} \varepsilon(k), M_{VD.min} \right\};$$

$$M_{trm.zd}(k) = \min \left\{ \gamma_M M_{VD.zd}(k) - M_{VR.zd}(k), M_{trm.max} \right\}.$$

Компоненты вектора управления при $M_{VR.zd}(k) > 0$

$$\beta_D(k) = \begin{cases} M_{DVS}^{-1}(\omega(k) \cdot \gamma^{-1}(k), M_{DVS.zd}(k)), & \text{при } M_{DVS.zd}(k) \geq M_{DVS.min}; \\ -1, & \text{при } M_{DVS.zd}(k) < M_{DVS.min}; \end{cases}$$

$$\beta_M(k) = M_{VD}^{-1}(\omega(k) \cdot \gamma_M^{-1}, M_{VD.zd}(k));$$

$$\beta_T(k) = 0;$$

$$\begin{aligned} \gamma(k) &= \gamma(\omega(k), \beta_D(k-1)) = \\ &= \arg \min_{\gamma \in \{\gamma_i\}, i=1,5} \left\{ g_e(\omega(k) \cdot \gamma^{-1}(k), \beta_D(k-1)) \right\}, \end{aligned}$$

где

$$M_{DVS.zd}(k) = \min \left\{ \frac{M_{VR.zd}(k) - \gamma_M M_{VD.zd}(k)}{\gamma(k)}, M_{DVS.max} \right\};$$

$$M_{VD.zd}(k) = \min \left\{ \frac{M_{VR.zd}(k)}{\gamma_M} \varepsilon(k), M_{VD.max} \right\},$$

при $M_{VD.zd}(k) > 0$;

$$M_{VD.zd}(k) = \max \left\{ \frac{M_{VR.zd}(k)}{\gamma_M} \varepsilon(k), M_{VD.min} \right\},$$

при $M_{VD.zd}(k) < 0$;

$g_e = g_e(\omega \gamma^{-1}, \beta_D)$ – зависимость эффективного циклового расхода топлива от скорости вращения коленчатого вала и положения органа управления мощностью ДВС.

При $M_{VR.zd}(k) = 0$ все агрегаты ГСУ отключены: $\beta_D(k) = -1$; $\beta_M(k) = 0$; $\beta_T(k) = 0$; $\gamma(k) = \gamma(k-1)$.

Зависимости

$$M_{DVS} = M_{DVS}(\omega \gamma^{-1}, \beta_D), \quad g_e = g_e(\omega \gamma^{-1}, \beta_D),$$

$$M_{VD} = M_{VD}(\omega \gamma_M^{-1}, \beta_M), \quad M_{trm} = M_{trm}(\beta_T)$$

могут быть получены в результате теоретических исследований или стендовых испытаний агрегатов, входящих в состав ГСУ.

Таким образом, задача оптимизации управления ГСУ может быть сведена к задаче определения функции

$$\varepsilon(k) = \varepsilon(M_{VR.zd}(k), \mathbf{x}(k)),$$

которая минимизирует функционал $J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N) \rightarrow \min$ на текущем ездовом цикле. Затем, при известном коэффициенте использования электропривода ε , управляющие воздействия ГСУ определяются регулятором ГСУ $\mathbf{u} = f_{GSU.RG}(\mathbf{x}, M_{VR.zd}, \varepsilon)$ согласно выражениям, приведенным выше.

Учитывая недостаток априорной информации о характере ездового цикла, подобно системам прогнозирующего модельного управления, величина коэффициента использования электропривода ε на k -м шаге должна выбираться системой управления с учётом оценок будущего значения критериев качества. Очевидно, что выбор стратегии управления должен стремиться к уменьшению величины потерь различных ресурсов на достаточно длительном отрезке времени $T \rightarrow \infty$. При этом проявляется несовершенство выбранного функционала, который неограниченно возрастает при $N \rightarrow \infty$. Для преодоления указанного недостатка при вычислении функционала качества управления будем использовать взвешенное (discounted) суммирование критериев

$$J_{SV\mu}(k) = \sum_{j=0}^{\infty} \mu^j \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{Pi} \mathfrak{F}_i(k+j),$$

где μ – дисконтный фактор, $0 < \mu < 1$. Дисконтный фактор учитывает, что чем дальше САУ ГСУ заглядывает в будущее при выборе управляющих воздействий, тем меньше её уверенность в оценке будущих потерь различных ресурсов из-за недостатка априорной информации.

Рассмотрим структурную схему адаптивного регулятора гибридной силовой установки, который реализует концепцию нейросетевого управления на основе адаптивной критики [8–10], приведенную на рис. 2.

На k -м шаге управления вычисление коэффициента использования электропривода осуществляется нейроконтроллером

$$\varepsilon = f_{GSU.NC}(\mathbf{x}, M_{VR.zd}),$$

который реализован в виде трёхслойной искусственной сети (ИНС) прямого распространения с активационной функцией нейронов скрытых слоёв в виде функции гиперболического тангенса и линейном нейроне выходного слоя

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{M}_{VR.zd} \\ \bar{\mathbf{x}} \end{bmatrix} &= 2 \left(\begin{bmatrix} M_{VR.zd} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} - \min_{k=0,N} \left\{ \begin{bmatrix} M_{VR.zd} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} \right\} \right); \\ &: \left(\max_{k=0,N} \left\{ \begin{bmatrix} M_{VR.zd} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} \right\} - \min_{k=0,N} \left\{ \begin{bmatrix} M_{VR.zd} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} \right\} \right) - 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_{NC1} &= \\ &= \frac{2}{1 + \exp\left(-2\left(\mathbf{W}_{NC1} \begin{bmatrix} \bar{M}_{VR.zd} \\ \bar{\mathbf{x}} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{NC1}\right)\right)} - 1; \end{aligned}$$

$$\mathbf{N}_{NC2} = \frac{2}{1 + \exp\left(-2\left(\mathbf{W}_{NC2} \mathbf{N}_{NC1} + \mathbf{B}_{NC2}\right)\right)} - 1;$$

$$\bar{\varepsilon} = \mathbf{W}_{NC3} \mathbf{N}_{NC2} + \mathbf{B}_{NC3};$$

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0,5(\bar{\varepsilon} + 1) \left(\max_{k=0,N} \{\varepsilon\} - \min_{k=0,N} \{\varepsilon\} \right) + \\ &+ \min_{k=0,N} \{\varepsilon\} \end{aligned}$$

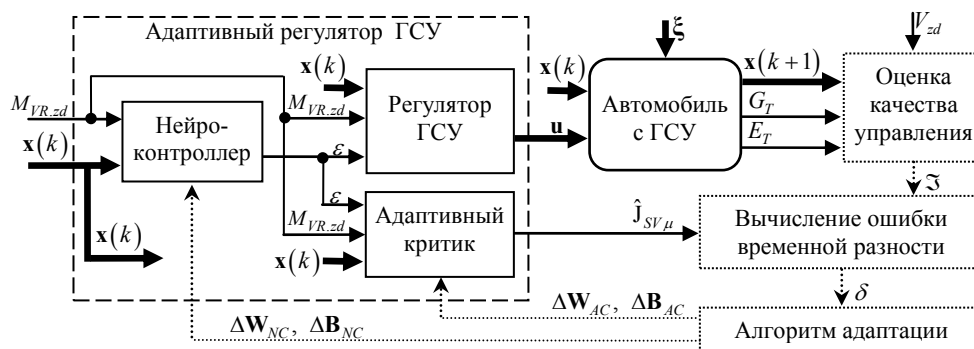


Рис. 2. Адаптивный регулятор гибридной силовой установки

где \mathbf{W}_{NC1} , \mathbf{W}_{NC2} , \mathbf{W}_{NC3} – матрицы весовых коэффициентов нейронов первого [12×3], второго [4×12] и третьего [1×4] слоев соответственно; \mathbf{B}_{NC1} , \mathbf{B}_{NC2} , \mathbf{B}_{NC3} – векторы смещений нейронов первого [12×1], второго [4×1] и третьего [1×1] слоев соответственно. Символом «:» обозначается поэлементное деление векторов.

Затем регулятор ГСУ определяет вектор управления $\mathbf{u} = f_{GSU.RG}(\mathbf{x}, M_{VR.zd}, \varepsilon)$. Управляющие воздействия подаются на вход объекта управления.

Адаптивный критик осуществляет оценку качества управления на данном шаге $\hat{J}_{SV\mu} = f_{GSU.AC}(\mathbf{x}, M_{VR.zd}, \varepsilon)$ с учётом прогноза будущих последствий данного управления. Адаптивный критик реализован на базе искусственной нейронной сети с архитектурой, подобной ИНС нейроконтроллера:

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_{AC1} &= \\ &= \frac{2}{1 + \exp\left(-2\left(\mathbf{W}_{AC1} \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon} \\ \bar{\mathbf{x}} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{AC1}\right)\right)} - 1; \end{aligned}$$

$$\mathbf{N}_{AC2} = \frac{2}{1 + \exp\left(-2\left(\mathbf{W}_{AC2} \mathbf{N}_{AC1} + \mathbf{B}_{AC2}\right)\right)} - 1;$$

$$\hat{J}_{SV\mu} = \mathbf{W}_{AC3} \mathbf{N}_{AC2} + \mathbf{B}_{AC3},$$

где \mathbf{W}_{AC1} , \mathbf{W}_{AC2} , \mathbf{W}_{AC3} – матрицы весовых коэффициентов нейронов первого [12×4], второго [4×12] и третьего [1×4] слоев соот-

ветственно; \mathbf{B}_{AC1} , \mathbf{B}_{AC2} , \mathbf{B}_{AC3} – векторы смещений нейронов первого $[12 \times 1]$, второго $[4 \times 1]$ и третьего $[1 \times 1]$ слоев соответственно.

Блок адаптации обеспечивает параметрическую настройку (обучение) ИНС нейроконтроллера и адаптивного критика путём настройки соответствующих матриц весовых коэффициентов и векторов смещений нейронов. Целевой функцией настройки нейроконтроллера является минимизация функционала $J_{SV\mu} \rightarrow \min$. Адаптивный критик обучается с минимальной ошибкой аппроксимировать функцию $J_{SV\mu} = f_{GSU.AC}(\mathbf{x}, M_{VR.zd}, \varepsilon)$.

Выражение для функционала качества управления на k -м шаге может быть записано в виде

$$J_{SV\mu}(k) = \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{Pi} \mathfrak{S}_i(k) + \mu J_{SV\mu}(k+1).$$

В этом случае ошибку адаптивного критика можно представить в виде ошибки временной разности

$$\begin{aligned} \delta(k) &= \hat{J}_{SV\mu}(k) - \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{Pi} \mathfrak{S}_i(k) + \mu \hat{J}_{SV\mu}(k+1) = \\ &= \hat{J}_{SV\mu}(k-1) - \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{Pi} \mathfrak{S}_i(k-1) + \mu \hat{J}_{SV\mu}(k) \end{aligned}$$

Для вычисления ошибки временной разности должны использоваться оценки $\hat{J}_{SV\mu}(k)$ и $\hat{J}_{SV\mu}(k+1)$ при одних и тех же значениях параметров ИНС адаптивного критика.

Коррекция параметров ИНС адаптивного критика осуществляется из условия минимизации квадратичной ошибки $e = 0,5 \cdot \delta^2$ согласно выражениям

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{ACi}(k+1) &= \mathbf{W}_{ACi}(k) + \Delta \mathbf{W}_{ACi}(k); \\ \mathbf{B}_{ACi}(k+1) &= \mathbf{B}_{ACi}(k) + \Delta \mathbf{B}_{ACi}(k), \quad i = \overline{1,3}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{W}_{ACi}(k) &= v_{AC} \Delta \mathbf{W}_{ACi}(k-1) - \\ &- \lambda_{AC} (1 - v_{AC}) \delta(k) \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}(k)}{\partial \mathbf{W}_{ACi}(k)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{B}_{ACi}(k) &= v_{AC} \Delta \mathbf{B}_{ACi}(k-1) - \\ &- \lambda_{AC} (1 - v_{AC}) \delta(k) \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}(k)}{\partial \mathbf{B}_{ACi}(k)} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC3}} = 1;$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC2}} = \mathbf{W}_{AC3}^T \times (1 - \mathbf{N}_{AC2}^2);$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC1}} = \mathbf{W}_{AC2}^T \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC2}} \times (1 - \mathbf{N}_{AC1}^2);$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{W}_{AC3}} = \mathbf{N}_{AC2}^T;$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{W}_{AC2}} = \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC2}} \mathbf{N}_{AC1}^T;$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{W}_{AC1}} = \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC1}} \cdot [\bar{\varepsilon} \quad \bar{M}_{VR.zd} \quad \bar{\mathbf{x}}];$$

λ_{AC} – коэффициент скорости обучения ИНС адаптивного критика; v_{AC} – коэффициент инерционности обучения, который в ряде случаев позволяет преодолеть локальные минимумы целевой функции в пространстве параметров сети; символом « \times » обозначается поэлементное умножение векторов.

Коррекция параметров ИНС нейроконтроллера осуществляется согласно выражениям:

$$\mathbf{W}_{NCi}(k+1) = \mathbf{W}_{NCi}(k) + \Delta \mathbf{W}_{NCi}(k);$$

$$\mathbf{B}_{NCi}(k+1) = \mathbf{B}_{NCi}(k) + \Delta \mathbf{B}_{NCi}(k), \quad i = \overline{1,3},$$

где

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{W}_{NCi}(k) &= v_{NC} \Delta \mathbf{W}_{NCi}(k-1) - \\ &- \lambda_{NC} \cdot (1 - v_{NC}) \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}(k)}{\partial \varepsilon(k)} \cdot \frac{\partial \varepsilon(k)}{\partial \mathbf{W}_{NCi}(k)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{B}_{NCi}(k) &= v_{NC} \Delta \mathbf{B}_{NCi}(k-1) - \\ &- \lambda_{NC} (1 - v_{NC}) \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}(k)}{\partial \varepsilon(k)} \cdot \frac{\partial \varepsilon(k)}{\partial \mathbf{B}_{NCi}(k)}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}(k)}{\partial \varepsilon(k)} = \left\{ \mathbf{W}_{AC1}^T \cdot \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC1}} \right\}_1;$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{B}_{NC3}} = 1;$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{B}_{NC2}} = \mathbf{W}_{NC3}^T \times (1 - \mathbf{N}_{NC2}^2);$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{B}_{NC1}} = \mathbf{W}_{NC2}^T \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{B}_{NC2}} \times (1 - \mathbf{N}_{NC1}^2);$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{W}_{NC3}} = \mathbf{N}_{NC2}^T;$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{W}_{NC2}} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{B}_{NC2}} \mathbf{N}_{NC1}^T;$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{W}_{NC1}} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{B}_{NC1}} \cdot [\bar{M}_{VR.zd} \quad \bar{x}];$$

λ_{NC} – коэффициент скорости обучения ИНС нейроконтроллера; ν_{NC} – коэффициент инерционности обучения. Символом « $\{\cdot\}_1$ » обозначается первый элемент вектора.

Таким образом, на каждом шаге улучшается закон управления путём обучения нейроконтроллера, а также повышается способность системы оценивать ситуацию путём обучения критика. Коррекция параметров продолжается, пока система не достигнет требуемого качества управления.

Выводы

На основании анализа особенностей автомобиля с гибридной силовой установкой как объекта управления по скорости показана возможность уменьшения размерности оптимизационной задачи путём введения новой переменной – коэффициента использования электропривода, который определённым образом связан с вектором управления силовой установкой при известных задающем воздействии и векторе состояния.

Значения коэффициента использования электропривода на каждом шаге управления, асимптотически приближающиеся к оптимальным в процессе движения по заданному ездовому циклу, могут быть получены на основе использования метода нейросетевых адаптивных критиков при постановке оптимизационной задачи в дискретном виде.

Литература

1. Development of Fuzzy Logic and Neural Network Control and Advance Emissions Modeling for Parallel Hybrid Vehicles / A. Rajagopalan, G. Washington, G. Rizzoni, Y. Guezennec. Center for Automotive Research. The Ohio State University Columbus, Ohio. Subcontract Report – December 2003 (<http://www.osti.gov/bridge>).
2. Сериков С.А. Нечёткая модель системы керування силовою установкою гібридного автомобіля / С.А. Сериков, Ю.Н. Борошенко, А.А. Дзюбенко // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2006. – Вип. IV(39). – С. 240–247.
3. Сериков С.А. Синтез оптимального управления гибридной силовой установкой / С.А. Сериков // Проблемы управления и информатики. – 2009. – №2. – С. 37–47.
4. Мосалов О.П. Самообучающиеся агенты на основе нейросетевых адаптивных критиков / О.П. Мосалов, Д.В. Прохоров, В.Г. Редько // Искусственный интеллект. – 2004. – Т.3. – С. 550–560.
5. Редько В.Г. Нейросетевые адаптивные критики / В.Г. Редько, Д.В. Прохоров // Научная сессия МИФИ-2004. Ч.2 Нейроинформатика-2004. – 2004. – С. 77–84.
6. Чернодуб А.Н. Обзор методов нейроконтроллера / А.Н. Чернодуб, Д.А. Дзюба // Проблемы программирования. – 2011. – № 2. – С. 79–94.
7. Автомобильный справочник. Перевод с англ. Первое русское издание. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2002. – 896 с.

Рецензент: О.П. Алексеев, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 01 июня 2012 г.